·调查研究·

宁波地区不同献血频次人群淋巴细胞精细亚群水平的观察研究

刘奕宇，陈芳，裘琼玲

【摘要】目的　探讨宁波地区不同献血频次对献血者淋巴细胞精细亚群水平的潜在影响。**方法**　本研究共纳入 580 名 18 ～ 58 岁献血者，依据历史献血次数分为低频组（1 ～ 3 次，278 例）与高频组（4 ～ 8 次，302 例），使用来源于回收献血者白细胞过滤器中的样本，通过多色流式细胞术检测 T 细胞、B 细胞和 NK 细胞等 16 项精细免疫表型检测指标。**结果**　献血频次与献血者年龄呈正相关（$P < 0.05$）；经主成分分析（PCA）结果显示，低频献血者与高频献血者在免疫表型可被有效区分；低频献血组人群不同时间点 T3、B2、B1、T4、T4TN、T4TCM、T8、T8TEM 差异均有统计意义（均 $P < 0.05$），高频献血组人群不同时间点 B2、NK1、NK3、T4TN、T4TEMRA、T4TCM、T8、T8TEM 及 T8TCM 差异均有统计意义（均 $P < 0.05$）。跟踪观察 31 名高频献血者在 2023 年 6—7 月和 2024 年 6—7 月的淋巴细胞精细亚群水平，T3、B2、T4TEMRA、T4TCM、T8 在连续献血者人群中仍存在差异（均 $P < 0.05$）。**结论**　在现行献血间隔与频次标准下，规律性无偿献血行为未导致献血者免疫功能出现显著异常，机体似乎能够通过自身的免疫重塑机制维持免疫稳态。

【关键词】 献血；免疫功能；淋巴细胞精细亚群；频率；流式细胞术
DOI:10.3969/j.issn.1671-0800.2026.06.012
【中图分类号】 R457.1　**【文献标志码】** A　**【文章编号】** 1671-0800(2026)06-0634-05

血液安全与献血者健康是无偿献血工作的核心，其中献血行为对机体免疫功能的影响一直是公众关注的焦点，而淋巴细胞亚群作为评估细胞免疫功能的关键指标[1-2]，其水平变化能直接反映机体免疫状态、功能及平衡情况。淋巴细胞精细亚群包括总 T 细胞（CD3+）、辅助/诱导 T 细胞（CD3+CD4+）、抑制/细胞毒 T 细胞（CD3+CD8+）、B 细胞（CD19+）及 NK 细胞（CD3-CD56+CD16+）等，各亚群的比例和数量异常与免疫缺陷病、病毒感染、恶性肿瘤等多种疾病密切相关，其检测结果对评估健康状况、辅助疾病诊断及监测预后具有重要临床价值[3]。目前已有研究关注献血对免疫指标的影响，研究显示部分血小板单采献血后特定时间段内部分淋巴细胞亚群可能出现轻微波动[4]，但未发现显著异常改变。不过针对不同献血频次对淋巴细胞精细亚群的长期影响研究仍较少，明确二者的关系，既能科学评估不同献血频次对献血者免疫功能的潜在影响，为优化献血者健康筛查标准、制定个性化献血指导方案提供依据，也能进一步完善无偿献血安全保障体系，增强献血人群的健康信心，推动地区无偿献血事业可持续发展。

1　资料与方法

1.1　一般资料　收集宁波市中心血站 2023 年 6—7 月、2023 年 11—12 月和 2024 年 6—7 月的全血献血者，献血者年龄 18 ～ 58 岁，献血次数在 8 次以内。跟踪 31 名献血者间隔 1 年的全血献血，分别在 2023 年 6—7 月和 2024 年 6—7 月，中间无献血行为。基于本研究纳入人群的历史献血次数分布特点，将献血次数 1 ～ 3 次定义为低频组，4 ～ 8 次定义为高频组。

1.2　试剂及仪器　流式细胞术检测包括抗体（厂家：泛肽生物科技（浙江）有限公司，荧光标记抗体包括 CD4 FITC、CD8 PE、CD45 PerCP-Cy5.5、CCR7 PE-Cy7、CD45RA APC、CD3 APC-Cy7、CD5 FITC、CD56

基金项目： 宁波市科技计划项目（2023S190）
作者单位： 315010 宁波，宁波市中心血站
通信作者： 刘奕宇，Email：wsjyzlyy@163.com

PE、CD16 PE-Cy7、CD19 APC），FBS（赛默飞，gibco）和 D-PBS（索莱宝）。主要仪器包括流式细胞仪（泛肽生物科技（浙江）有限公司，型号：DiagCyto6C2L），离心机（Eppendorf，型号 5810R），生物安全柜（济南鑫贝西生物技术有限公司，型号：BSC-1100 Ⅱ A2-X）。

1.3　白细胞过滤器中白细胞回收　使用含 2%FBS 的 D-PBS 缓慢冲洗回收白细胞过滤器中的白细胞，每个过滤器使用 50 mL 含 2%FBS 的 D-PBS 冲洗，洗脱后回收的细胞调整细胞浓度为 1×10^6 /mL 用于后续的精细亚群检测。

1.4　T/B/NK 淋巴细胞精细亚群检测　每个样本做 2 管，T 细胞管和 BNK 管，取混匀的回收白细胞样本 100 μL，T 细胞管加入 CD4 FITC、CD8 PE、CD45 PerCP-Cy5.5、CCR7 PE-Cy7、CD45RA APC 和 CD3 APC-Cy7 各 5 μL；BNK 管加入 CD5 FITC、CD56 PE、CD45 PerCP-Cy5.5、CD16 PE-Cy7、CD19 APC 和 CD3 APC-Cy7 各 5 μL，混匀后避光孵育 15 min，加入 1 mL PBS 室温下 300×g 离心 5 min，弃去上清后加入 0.5 mL PBS，流式细胞仪上检测。

1.5　统计方法　采用 R4.5.2 统计软件进行数据分析，符合正态分布的计量资料以均数±标准差表示，组间比较采用 t 检验或配对 t 检验；非正态分布的计量资料以 M（P_{25}，P_{75}）表示，组间比较采用 Mann-Whitney 检验。多组间比较采用 One-Way ANOVA 检验，当方差不齐时采用 Kruskal-Wallis 检验；鉴于年龄对部分免疫指标的显著影响，本研究采用协方差分析（ANCOVA）控制年龄因素，进行两组间免疫指标的差异分析。$P<0.05$ 表示差异有统计学意义。

2　结果

2.1　不同献血频次献血者的淋巴细胞精细亚群水平情况　共纳入 580 例献血者，根据献血频次分成 1～8 次组，随着献血频次的增加，献血者年龄增加，人数呈现减少趋势，见表 1。将年龄指标与 T/B/NK 细胞亚群检测指标进行相关性分析并进行主成分分析（PCA，principal component analysis），观察献血频次与年龄和精细亚群指标的关系见图 1～2。

表 1　不同献血频次献血者的基础资料

献血频次（次）	人数	男性占比（%）	年龄（岁）
1	153	81.0	29（24，36）
2	49	51.0	28（24，37）
3	76	82.9	29.5（24，35.25）
4	85	64.7	38.2±7.8
5	64	64.1	38.7±7.6
6	70	85.7	38.9±6.8
7	51	84.3	40.3±6.6
8	32	65.6	42.5±8.4
F 值			25.30
P 值			＜0.05

2.2　不同献血频次组人群不同献血时期的淋巴细胞精细亚群水平比较　将与年龄存在相关性的指标进行协方差分析去除年龄影响，低频献血组人群不同时间点 T3、B2、B1、T4、T4TN、T4TCM、T8、T8TEM 差异均有统计意义（均 $P<0.05$），高频献血组人群不同时间点 B2、NK1、NK3、T4TN、T4TEMRA、T4TCM、T8、T8TEM 及 T8TCM 差异均有统计意义（均 $P<0.05$），见表 2～3。

2.3　高频献血者连续献血前后淋巴细胞精细亚群水平变化　跟踪观察 31 名高频献血者在 2023 年 6—7 月和 2024 年 6—7 月的淋巴细胞精细亚群水平，结合表 3 和表 4 中高频献血者具有显著差异的指标，T3、B2、T4TEMRA、T4TCM、T8 在连续献血者人群中仍存在差异（均 $P<0.05$），见表 4。

3　讨论

近年来，淋巴细胞精细亚群逐步普及，区别与传统简单的淋巴细胞亚群分类，其不仅局限于免疫细胞表型的初级分类，进一步根据其活化状态、功能特征等特点精细化分类，呈现更丰富多样的亚群类别，能进一步评估机体的免疫功能能力。本研究使用献血人群白细胞过滤器中回收的白细胞对其免疫功能指标进行研究。近年来，对这类白细胞的免疫表型研究逐渐增多[5-6]，其

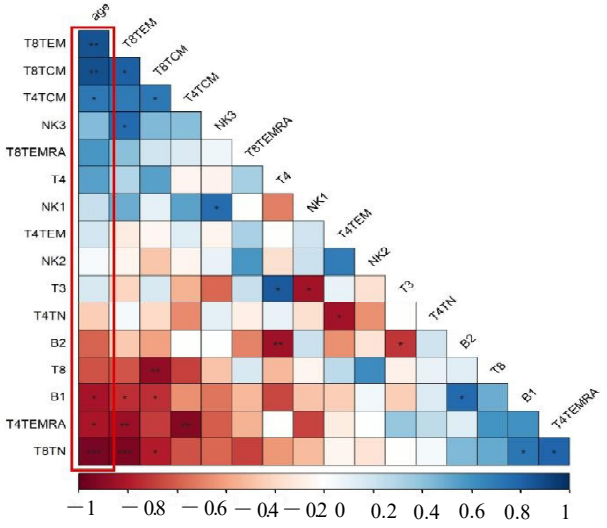
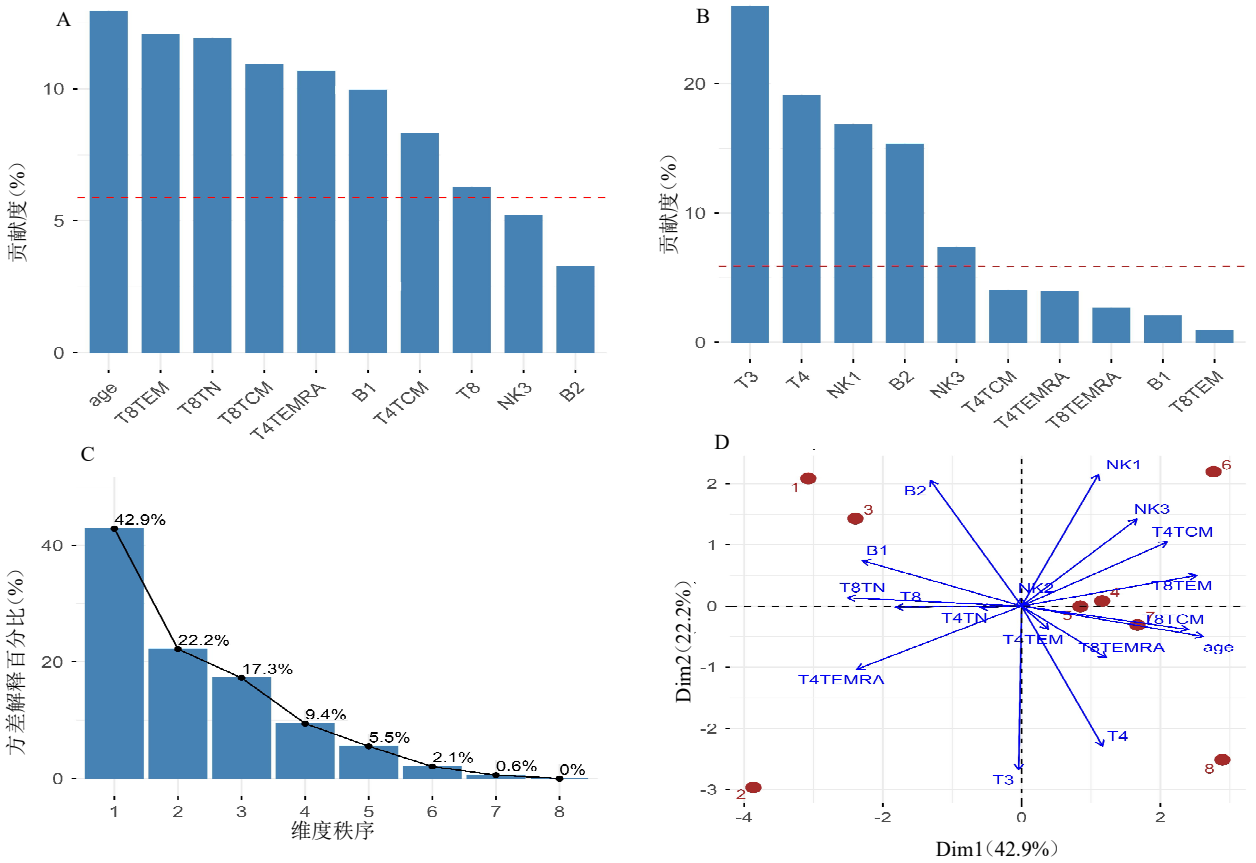


图 1　年龄和淋巴细胞精细亚群指标的关系



注：A 为主成分 1 中贡献前十项的指标，B 为主成分 2 中贡献前十项的指标，C 为主成分碎石图，D 为主成分 1 和主成分 2 的 Bioplot 图，红色带数字标签的为献血频次（1 ～ 8 次），带指标标签的向量显示对两个主成分的影响大小，方向表示正负

图 2　年龄、淋巴细胞精细亚群与献血频次的 PCA 分析

表 2　低频献血组人群不同时间点淋巴细胞精细亚群指标水平比较

指标	时间点 1（n=86）	时间点 2（n=51）	时间点 3（n=141）	H（F）值	P 值
年龄	28.0（24.0，35.8）	31.0（24.5，35.0）	29.0（24.0，36.0）	0.12	＞ 0.05
T3（%）	74.9（69.0，79.4）	79.5（73.4，85.0）	72.0±0.09	（10.57）	＜ 0.05
B2（%）[a]	7.5（5.8，9.6）	7.2±0.04	9.9（8.0，13.1）	21.12	＜ 0.05
B1（%）[ab]	1.9（1.9，1.9）	1.9（1.9，1.9）	2（2，2）	11.58	＜ 0.05
NK2（%）	0.7（0.5，0.9）	0.7（0.5，1.0）	0.6（0.4，0.9）	2.28	＞ 0.05
NK1（%）	11.7（7.8，16.8）	8.4（6.1，14.3）	11.5（7.0，16.4）	2.77	＞ 0.05
NK3（%）	1.0（0.7，1.5）	0.8（0.6，1.2）	1.0（0.6，1.4）	2.24	＞ 0.05
T4（%）	42.8±0.08	44.3±0.08	39.2±0.08	（9.91）	＜ 0.05
T4TN（%）	49.9±0.12	43.8±0.13	47.1±0.12	（3.93）	＜ 0.05
T4TEMRA（%）[ab]	3（2.9，3）	2.9（2.9，3）	3.2（3.2，3.2）	0.80	＞ 0.05
T4TEM（%）	16.9（13.7，22.7）	18.5（14.7，25.8）	17.8（14.0，22.2）	1.53	＞ 0.05
T4TCM（%）[ab]	31.2（31，31.3）	31（31，31.3）	31.7（31.7，31.7）	3.95	＜ 0.05
T8（%）	27.0±0.06	28.6±0.07	24.5（20.9，29.5）	5.29	＜ 0.05
T8TN（%）[ab]	47.8（47.7，48）	48（47.7，48）	47.4（47.4，47.4）	1.23	＞ 0.05
T8TEMRA（%）	24.2（17.5，32.6）	25.8±0.12	22.7（15.9，33.3）	0.23	＞ 0.05
T8TEM（%）[ab]	18.1（17.9，18.2）	18.2（17.9，18.2）	17.7（17.7，17.7）	4.08	＜ 0.05
T8TCM（%）[ab]	6.8（6.8，6.9）	6.8（6.8，6.9）	6.9（6.9，6.9）	2.25	＞ 0.05

注：时间点 1 为 2023 年 6—7 月，时间点 2 为 2023 年 11—12 月，时间点 3 为 2024 年 6—7 月；a：方差不齐，采用 Kruskal-Wallis 检验，b：经过协方差分析去除混杂因素

免疫表型基本与外周血中白细胞表型一致[7-8]。

本研究系统评估了宁波地区不同献血频次人群的淋巴细胞精细亚群水平，主要包括 T 淋巴细胞（CD3+）及其亚群，辅助/诱导 T 淋巴细胞（CD3+CD4+）和抑制/毒性 T 淋巴细胞（CD3+CD8+），细胞根据 CD45RA 和 CCR7 两个膜表面标志物对 T 淋巴

表 3　高频献血组人群不同时间点淋巴细胞精细亚群指标水平比较

指标	时间点 1（n=166）	时间点 2（n=92）	时间点 3（n=44）	H（F）值	P 值
年龄	38.5±7.4	39.8±7.8	41.2±6.8	（2.58）	＞ 0.05
T3（%）[a]	75.1±0.08	73.0（67.7，79.8）	73.9±0.05	1.78	＞ 0.05
B2（%）	6.5（4.7，9.2）	6.1（3.9，9.7）	11.2±0.04	17.08	＜ 0.05
B1（%）[ab]	1.7（1.6，1.8）	1.7（1.7，1.8）	1.7（1.6，1.7）	21.53	＞ 0.05
NK2（%）[a]	0.7（0.5，0.9）	0.6（0.5，0.9）	0.6（0.5，0.8）	0.40	＞ 0.05
NK1（%）[a]	13.1（8.3，18.2）	14.9（10.0，19.3）	9.8（6.4，11.9）	9.68	＜ 0.05
NK3（%）[a]	1.0（0.7，1.6）	1.2（0.9，2.1）	1.1（0.8，1.6）	5.06	＜ 0.05
T4（%）[a]	43.6±0.09	44.6±0.08	42.3±0.06	（1.19）	＞ 0.05
T4TN（%）	48.8±0.12	45.2±0.13	45.3±0.12	（3.24）	＜ 0.05
T4TEMRA（%）[ab]	2.3（2.1，2.7）	2.5（2.3，2.7）	2.3（2.1，2.5）	4.60	＜ 0.05
T4TEM（%）	18.4（15.4，22.9）	18.7（15.3，23.1）	17.2（14.0，23.2）	0.35	＞ 0.05
T4TCM（%）[ab]	29.9（29.5，30.6）	30.2（29.9，30.6）	29.9（29.5，30.2）	11.84	＜ 0.05
T8（%）	27.0（21.9，30.9）	25.2（19.4，28.3）	24.7±0.07	6.36	＜ 0.05
T8TN（%）[ab]	48.8（48.3，49.1）	48.5（48.3，48.8）	48.8（48.5，49.1）	0.72	＞ 0.05
T8TEMRA（%）	26.0（18.9，36.9）	24.7（16.5，31.6）	27.9±0.15	1.56	＞ 0.05
T8TEM（%）[ab]	18.8（18.4，19）	18.6（18.4，18.8）	18.8（18.6，19）	3.64	＜ 0.05
T8TCM（%）[ab]	6.7（6.6，6.8）	6.7（6.7，6.8）	6.7（6.6，6.7）	9.02	＜ 0.05

注：时间点 1 为 2023 年 6—7 月，时间点 2 为 2023 年 11—12 月，时间点 3 为 2024 年 6—7 月；a：方差不齐，采用 Kruskal-Wallis 检验，b：经过协方差分析去除混杂因素

表 4　高频献血者连续献血前后淋巴细胞精细亚群指标水平

指标	时间点 1（n=31）	时间点 3（n=31）	Z（t）值	P 值
T3（%）	74.3±0.08	70.2±0.08	（3.35）	＜ 0.05
B2（%）	6.2（4.8，7.7）	9.8±0.04	4.11	＜ 0.05
B1（%）[a]	1.73（1.6，1.8）	1.66（1.53，1.73）	1.73	＞ 0.05
NK2（%）	0.7（0.6，0.9）	0.6（0.5，1.0）	0.08	＞ 0.05
NK1（%）	14.6±0.07	14.8±0.08	（0.16）	＞ 0.05
NK3（%）	1.1（0.8，1.7）	0.9（0.7，1.4）	1.54	＞ 0.05
T4（%）	43.7±0.08	42.2±0.08	（1.58）	＞ 0.05
T4TN（%）	50.8±0.10	50.1±0.11	（0.63）	＞ 0.05
T4TEMRA（%）[a]	2.49（2.12，2.67）	2.3（1.93，2.49）	2.10	＜ 0.05
T4TEM（%）	17.3±0.05	16.7±0.06	（1.05）	＞ 0.05
T4TCM（%）[a]	30.22（29.48，30.6）	29.85（29.11，30.22）	2.22	＜ 0.05
T8（%）	26.9±0.08	23.9±0.08	（6.69）	＜ 0.05
T8TN（%）[a]	48.54（48.25，49.11）	48.83（48.54，49.4）	1.76	＞ 0.05
T8TEMRA（%）	29.0±0.13	28.1±0.14	（0.92）	＞ 0.05
T8TEM（%）[a]	18.61（18.39，19.04）	18.83（18.61，19.26）	1.86	＞ 0.05
T8TCM（%）[a]	6.72（6.62，6.77）	6.67（6.56，6.72）	1.54	＞ 0.05

注：时间点 1 为 2023 年 6—7 月，时间点 3 为 2024 年 6—7 月，a：经过协方差分析去除混杂因素

细胞亚群做功能化分型，分别为初始 T 细胞（naive T cell，TN，CD45RA+CCR7+）、中央记忆 T 细胞（central memory T cells，TCM，CD45RA-CCR7+）、效应记忆 T 细胞（effector memory T cells，TEM，CD45RA-CCR7-）、终末分化效应记忆 T 细胞（terminally differentiated effector memory T cells，TEMRA，CD45RA+CCR7-）[9-11]。NK 细胞通过 CD16 和 CD56 两个标志物做了功能亚群分型检测，分别为 NK1 细胞（CD3-CD56+CD16+）、NK2（CD3-CD56+CD16-）和 NK3（CD3-CD56-CD16+）[9]。B 细胞通过是否表达 CD5 分为 B1 细胞（CD19+CD5+）和 B2 细胞（CD19+CD5-）[12-13]，所有检测结果基本在健康人群的参考值范围内[14-15]。由此可见，献血人群的整体细胞免疫功能在健康范围内，也符合献血的基本要求。

本研究结果表明，献血频次与献血者年龄呈正相关。同时 T8TEM、T8TCM 和 T4TCM 与年龄呈正相关，T8TN、T4TEMRA 和 B1 与年龄呈负相关。通过协方差分析，统一将上述指标的年龄控制在研究群体的平均年龄，以此去除年龄对组间比较的影响。鉴于年龄是影响机体免疫功能的关键生理因素，对免疫细胞的发育、分化及功能具有深远且持续的影响，并与淋巴细胞亚群水平的变化密切相关[7-13]。因此，本研究进一步分析了年龄与淋巴细胞亚群各项检测指标间的相关性，并进行了主成分分析（PCA）。分析结果表明年龄与多项淋巴细胞精细亚群指标存在相关性，同时，PCA 分析显示，T8TEM、T8TN、T8TCM、T4TEMRA、T3、T4、NK1 以及 B2 细胞等指标能够有效区分低频献血者与高频献血者群体。这提示不同献血频次人群的免疫表型确实存在差异，而年龄可能是造成这种差异的主要因素之一。

基于本研究纳入人群的历史献血次数分布特点，本研究将献血者明确划分为低频献血组和高频献血组，并进一步比较了两组人群在三个不同献血时间点的淋巴细胞亚群水平。这三个时间点在季节和某些流行病

的发生率方面存在变化。已有研究表明，季节变化可能会影响献血者血液检测指标，例如丙氨酸氨基转移酶（ALT）的不合格率会随季节波动[16]。因此，观察献血人群在季节性变化下细胞免疫功能的差异具有一定意义。研究结果表明，高频献血者表现出相对更成熟的T细胞库特征，如在不同献血期，相比低频献血者，其比例无显著差异。这提示长期规律性的献血未对适应性免疫形成影响。通过对 31 名高频献血者进行跨年度、连续献血前后的追踪观察，发现其绝大部分淋巴细胞亚群水平保持稳定，仅 T3、B2、T4TEMRA、T4TCM、T8 细胞比例在不同时间点间存在差异。该现象提示高频献血者的细胞免疫功能具备强大的代偿与维持稳态的能力。即使在达到较高献血频次（最高 8 次）的情况下，其免疫系统核心指标仍能保持相对稳定，表明在现行的献血间隔与频次标准下，对健康成年人的免疫功能未造成显著的负面影响。季节性变化对两组献血者的淋巴细胞亚群均产生影响，但模式有所不同。低频献血者主要表现为T细胞比例的波动，而高频献血者则主要表现为NK1细胞比例的波动；其中，NK 细胞是重要的固有免疫效应细胞，反应迅速[17]，而 T 细胞作为适应性免疫的一部分，在应对再次感染时能快速、高效地发挥作用[18-20]。

综上所述，本研究从淋巴细胞精细亚群的角度，为现行无偿献血实践的安全性提供了有力的免疫学证据。同时，本研究也为未来探索基于个体淋巴细胞亚群特征、更为个性化的献血指导策略，以进一步提升对献血者健康的保障水平，提供了有价值的参考方向。

利益冲突　所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明　刘奕宇：研究指导，论文撰写，经费支持，论文修改；陈芳、裘琼玲：实验操作，数据整理，统计学分析

参 考 文 献

[1] Maecker H T, McCoy J P, Nussenblatt R. Standardizing immunophenotyping for the human immunology project[J]. Nat Rev Immunol, 2012, 12(3): 191-200.

[2] Finak G, Langweiler M, Jaimes M, et al. Standardizing flow cytometry immunophenotyping analysis from the human ImmunoPhenotyping consortium[J]. Sci Rep, 2016, 6: 20686.

[3] Rühle P F, Fietkau R, Gaipl U S, et al. Development of a modular assay for detailed immunophenotyping of peripheral human whole blood samples by multicolor flow cytometry[J]. Int J Mol Sci, 2016, 17(8): 1316.

[4] 伍娟,王大明,张艳艳,等.双份机采血小板献血者 T、B 淋巴细胞亚群研究[J].临床输血与检验,2015,17(3):197-199.

[5] Dietz A B, Bulur P A, Emery R L, et al. A novel source of viable peripheral blood mononuclear cells from leukoreduction system chambers[J]. Transfusion, 2006, 46(12): 2083-2089.

[6] Néron S, Thibault L, Dussault N, et al. Characterization of mono nuclear cells remaining in the leukoreduction system chambers of apheresis instruments after routine platelet collection: A new source of viable human blood cells[J]. Transfusion, 2007, 47(6): 1042-1049.

[7] Sasani N, Roghanian R, Emtiazi G, et al. Design and introduction of a rational mechanical eluting system for leukocyte recovery from leukoreduction filters: A cell differential approach[J]. Transfus Clin Biol, 2020, 27(3): 172-178.

[9] Oras A, Quirant-Sanchez B, Popadic D, et al. Comprehensive flow cytometric reference intervals of leukocyte subsets from six study centers across Europe[J]. Clin Exp Immunol, 2020, 202(3): 363-378.

[10] Mousset C M, Hobo W, Woestenenk R, et al. Comprehensive phenotyping of T cells using flow cytometry[J]. Cytometry A, 2019, 95(6): 647-654.

[11] Alpert A, Pickman Y, Leipold M, et al. A clinically meaningful metric of immune age derived from high-dimensional longitudinal monitoring[J]. Nat Med, 2019, 25(3): 487-495.

[12] Tang G X, Yuan X, Luo Y, et al. Establishing immune scoring model based on combination of the number, function, and phenotype of lymphocytes[J]. Aging, 2020, 12(10): 9328-9343.

[13] Borriello F, Pasquarelli N, Law L, et al. Normal B-cell ranges in infants: A systematic review and meta-analysis[J]. J Allergy Clin Immunol, 2022, 150(5): 1216-1224.

[14] Zhang L J, Zhong H X, Wei B, et al. Establishing reference values for peripheral blood lymphocyte subsets of healthy children in China using a single platform[J]. J Immunol Res, 2022, 2022: 5603566.

[15] Liu W, Xu J, Pu Q Y, et al. The reference ranges and characteristics of lymphocyte parameters and the correlation between lymphocyte parameters and routine health indicators in adults from China[J]. Immun Ageing, 2022, 19(1): 42.

[16] 王洪.不同季节献血者 ALT 的不合格率变化及参考值波动的研究[J].中国输血杂志,2012,25(S1):96-97.

[17] Khani L, Jazayeri M H, Nedaeinia R, et al. The frequencies of peripheral blood CD5+CD19+ B cells, CD3-CD16+CD56+ NK, and CD3+CD56+ NKT cells and serum interleukin-10 in patients with multiple sclerosis and neuromyelitis optica spectrum disorder[J]. Allergy Asthma Clin Immunol, 2022, 18(1): 5.

[18] Wang Y F, Tian Q, Hao Y X, et al. The kinase complex mTORC2 promotes the longevity of virus-specific memory CD4+ T cells by preventing ferroptosis[J]. Nat Immunol, 2022, 23(2): 303-317.

[19] Larbi A, Fulop T. From “truly naive” to “exhausted senescent” T cells: When markers predict functionality[J]. Cytometry Pt A, 2014, 85(1): 25-35.

[20] Künzli M, Masopust D. CD4+ T cell memory[J]. Nat Immunol, 2023, 24(6): 903-914.

收稿日期：2025-12-03

（本文编辑：陈志翔）